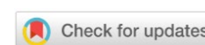
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 004.032.26, 531.3

Оригинальное эмпирическое исследование

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-264-273

Определение динамических напряжений и перемещений при действии ударной нагрузки на двухслойную конструкцию в процессе индентирования



EDN: VVRPYB

Н.Е. Бабушкина, **А.А. Ляпин**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ copybird@yandex.ru

Аннотация

Введение. Многие исследователи надежности строительных конструкций уделяют внимание твердости — важной характеристике конструкционного материала. Ее определяют индентированием — вдавливанием наконечника инструмента в поверхность. Исследуются преимущества методов динамического индентирования, распределение интенсивности напряжений на поверхности и внутри образца. Однако мало изучено состояние слоистых материалов при ударе. Цели представленной работы — рассмотреть индентирование для двухслойного образца и определить чувствительность верхнего слоя к прочности подложки. Это позволит выявить значимые характеристики прочностных свойств однородных и неоднородных конструкций.

Материалы и методы. Использовали упруго-пластическую модель поведения материала и схему ударного индентирования, которая учитывает массы индентора и ударника, сцепленных линейными пружинами. Поверхность индентора — коническая, угол раскрытия — 120°. Удар моделировали в системе Matlab. Конечноэлементную модель в Ansys APDL применили для верификации данных и анализа результатов эксперимента. Для расчетов взяли традиционные модели теории упругости. Поведение материала в области пластического деформирования описали с помощью опций мультилинейного изотропного упрочнения и критерия пластичности Мизеса.

Результаты исследования. Приводятся итоги сопоставления трех вариантов варьирования уровня предела текучести в нижнем слое: когда предел текучести в нижнем слое вдвое меньше верхнего, равен ему и вдвое больше. Проанализированы перемещения в разных точках наблюдения для образцов с верхним слоем 2 мм и 1 мм. В первом случае при горизонтальном сдвиге не меняются показатели перемещений внутри образца, если уровень предела текучести вдвое ниже или выше, чем в верхнем. При равенстве этих показателей разница становится заметной. Во втором случае (слой 1 мм) разница перемещений видна во всех точках наблюдения. Так можно обоснованно заключить, что конструкция с меньшим верхним слоем более чувствительна к ударному воздействию. В ходе изысканий стало известно, что в зоне 2 мм совершаются колебания, связанные с переходом в зону пластичности, ниже этой зоны — упругие затухающие колебания. Решили задачу классификации для верхнего слоя материала с меняющимися характеристиками основания. Показатель для сравнения — твердость по Бринеллю (HB) в диапазоне 200–600. Результаты визуализировали в виде графиков и обработали с помощью нейросети. Точность ее вычислений составила 98 %.

Обсуждение и заключение. Для определения прочностных свойств однородных конструкций достаточно характеристики скорости перемещения внутри образца. Для неоднородной структуры необходимо вводить дополнительные параметры — перемещения на поверхности и внутри образца в фиксированных точках наблюдений. Комплексный подход к определению прочностных свойств неоднородной конструкции повышает точность расчетов, а использование нейросетей — их скорость.

Ключевые слова: многослойная конструкция, слоистый материал при ударе, уровень предела текучести, твердость по Бринеллю, прочность неоднородной конструкции

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Бабушкина Н.Е., Ляпин А.А. Определение динамических напряжений и перемещений при действии ударной нагрузки на двухслойную конструкцию в процессе индентирования. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):264–273. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-264-273

Original Empirical Research

Determination of Dynamic Stresses and Displacements under the Action of an Impact Load on a Two-Layer Structure during the Indentation Process

Natalia E. Babushkina ✉, **Alexandr A. Lyapin**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ copybird@yandex.ru

Abstract
Introduction. Numerous researchers of the reliability of building structures pay attention to hardness, an important characteristic of the structural material. It is determined by indentation — pressing the tip of the tool into the surface. The advantages of dynamic indentation methods and the distribution of stress intensity on the surface and inside the sample are investigated. However, the condition of layered materials on impact has been poorly studied. The objective of the presented work is to consider indentation for a two-layer sample and determine the sensitivity of the top layer to the strength of the substrate. This will allow us to identify significant characteristics of the strength properties of homogeneous and heterogeneous structures.
Materials and Methods. An elastoplastic model of material behavior and a shock indentation scheme were used, which took into account the masses of the indenter and the striker coupled by linear springs. The surface of the indenter was conical, the opening angle was 120°. The impact was simulated in the MATLAB system. Finite element model in Ansys APDL was used to verify the data and analyze the results of the experiment. Traditional models of elasticity theory were used for calculations. The behavior of the material in the zone of plastic deformation was described using the options of multilinear isotropic hardening and the von Mises plasticity criterion.
Results. The results of comparing three versions of varying the level of yield strength in the bottom layer are presented: when the yield strength in the bottom layer is half as high as the top one, equal to it, and twice as high. Displacements at different observation points for samples with a top layer of 2 mm and 1 mm were analyzed. In the first case, under horizontal shear, the displacement indices inside the sample did not change if the yield strength level was twice lower or higher than in the top one. If these indicators were equal, the difference became noticeable. In the second case (layer 1 mm), the difference in displacement was visible at all observation points. Thus, it can be reasonably concluded that a structure with a smaller top layer is more sensitive to impact. In the course of the research, it became known that vibrations associated with the transition to the plasticity zone occurred in the 2 mm zone, and elastic damping vibrations occurred below this zone. We solved the classification problem for the top layer of the material with changing characteristics of the base. The indicator for comparison was the Brinell hardness (HB) in the range of 200–600. The results were processed using a neural network and visualized in the form of graphs. The accuracy of its calculations was 98%.
Discussion and Conclusion. To determine the strength properties of homogeneous structures, it is sufficient to characterize the speed of displacement inside the sample. For an inhomogeneous structure, additional parameters should be introduced — displacements on the surface and inside the sample at fixed observation points. An integrated approach to determining the strength properties of an inhomogeneous structure improves the accuracy of calculations, and the use of neural networks increases their speed.

Keywords: multilayer structure, layered material on impact, yield strength level, Brinell hardness, strength of heterogeneous structure

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For Citation. Babushkina NE, Lyapin AA. Determination of Dynamic Stresses and Displacements under the Action of an Impact Load on a Two-Layer Structure during the Indentation Process. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):264–273. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-264-273

Введение. При проектировании и эксплуатации строительных конструкций предъявляются высокие требования к их прочности и надежности [1]. В литературе рассматриваются вопросы безотказности работы конструкции [2], а также сохранения ее эксплуатационных свойств на протяжении всего срока службы [3].

С инженерной точки зрения твердость — одна из важных характеристик материала. Она связана с такими механическими свойствами, как предел текучести, предел прочности, предел выносливости и пр. Твердость материала определяют вдавливанием наконечника инструмента в поверхность. Различают статическое и динамическое вдавливание. Испытание на статическое вдавливание включает вдавливание твердого индентора в плоскую и гладкую поверхность мягкого материала (мишени), механические свойства которого определяются по измеренной зависимости приложенной нагрузки от глубины внедрения. Статические методы не позволяют оценить физико-математические характеристики материала в условиях динамического нагружения [4]. Для этого используют методы динамического индентирования [4].

ГОСТ Р 56474–2015[1] представляет динамическое индентирование как внедрение индентора в материал под действием однократного ударного импульса, создаваемого специальным разгонным устройством или силой тяжести. Такой подход относится к методам неразрушающего контроля. Их основной принцип — безопасное обследование, определение целостности и основных рабочих свойств объекта [5]. Главное преимущество — простота применения.

Испытание на вдавливание — это сложный процесс, который включает механику контакта, нелинейность материала и механику разрушения. Для общих случаев очень трудно получить аналитические решения. Поэтому понимание рассматриваемых процессов основано главным образом на экспериментах и моделировании методом конечных элементов.

Упругий контакт впервые изучил Г. Герц [6] в конце XIX века. Он пытался найти точное определение твердости, используя эластичный процесс. Позже Ж.В. Буссинеск разработал основанный на теории потенциала метод расчета напряжений и перемещений в упругом теле, нагруженном любым жестким осесимметричным индентором. Что касается углублений, связанных с пластической деформацией, то ранние исследования были сосредоточены на пределе текучести и прочности при растяжении.

В публикациях уделяется внимание методам динамического индентирования с целью определения прочностных свойств конструкций. Так, Н.Н. Автономов и А.В. Тололо рассмотрели задачу вдавливания шарового индентора в упругопластический материал [7]. Авторы проанализировали распределение интенсивности напряжений на поверхности и внутри образца. Так стало известно, что зоны максимальной интенсивности располагаются на небольшом расстоянии от зоны контакта индентора и образца, а при увеличении нагрузки расширяются.

Зарубежные авторы [8] разработали метод динамического вдавливания, заключающийся в измерении глубины и реакции на нагрузку образца в процессе вдавливания. Для определения углубления использовался метод измерения смещений, основанный на муаровой интерферометрии. Нагрузку измеряли кварцевым датчиком. Результаты численного моделирования методом конечных элементов свидетельствуют о том, что такой подход достаточно хорошо согласуется со значениями, полученными при традиционных методах определения скорости деформации.

Ученые рассматривали прочностные свойства материалов в процессе индентирования. Этому посвящено немало работ, например [9]. Изучение поведения «мишени» под воздействием механических нагрузок играет ключевую роль в разработке новых материалов, конструкций и изделий [10]. Комплексные исследования позволяют решать задачи оптимизации технологических процессов, обеспечения надежности конструкций и предотвращения отказов в их работе.

Полученные решения открывают возможность создавать более эффективные и устойчивые структуры [11], что обусловливает актуальность изысканий в данном направлении. При этом все еще недостаточно изучен вопрос состояния слоистых конструкций при ударном воздействии.

Цели работы — анализ напряжений и перемещений в двухслойной конструкции и выявление уровня чувствительности верхнего слоя образца к прочности подложки. Исследование позволит установить значимые характеристики для определения прочностных свойств однородных и неоднородных конструкций.

Материалы и методы. Схема прибора ударного индентирования представлена на рис. 1.

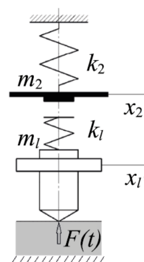


Рис. 1. Схема прибора ударного индентирования

[1] ГОСТ Р 56474–2015. *Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200122009 (дата обращения: 14.05.2024).

Система дифференциальных уравнений, соответствующая динамике механических элементов прибора ударного индентирования, имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 &= k_1\left(x_2 - x_1\right) - F\left(t\right), \\ m_2\ddot{x}_2 &= -k_2x_2 - k_1\left(x_2 - x_1\right). \end{aligned} \tag{1}$$

Так описывается колебательный процесс динамической системы с двумя массами: m_1 — масса индентора; m_2 — масса ударника. Массы сцеплены линейными пружинами с жесткостью k_1 и k_2 соответственно [12]. Величины вертикальных перемещений $x_1(t)$, $x_2(t)$ как степени свободы массивных элементов неизвестны во времени. Ударник взвели на высоту h. После спуска в момент контакта с индентором он достиг скорости

$$v_{20} = \sqrt{2gh + \frac{k_2h^2}{m_2}}.$$

Таким образом, к системе (1) следует добавить начальные условия:

$$x_1\left(0\right) = 0,\ \dot{x}_1\left(0\right) = 0,\ x_2\left(0\right) = 0,\ \dot{x}_2\left(0\right) = v_{20}. \tag{2}$$

Неизвестна величина $F(t)$ силы сопротивления со стороны индентируемого материала.

Считаем, что поверхность индентора — коническая с углом раскрытия α = 120 град. Значит, необходимо использовать упруго-пластическую модель поведения испытуемого материала. В вершине конуса совпадает начало ударного воздействия и пластической деформации.

Ударный процесс моделировали в системе «Матлаб» (Matlab). Это позволило подобрать механические параметры установки. Для верификации данных и анализа результатов эксперимента использовали конечноэлементную модель в среде Ansys APDL. Рассматривалась двухслойная конструкция. Анализировались ее перемещения и напряжения, возникающие в двухслойном образце при действии динамической нагрузки. В расчетах применялись традиционные модели теории упругости. Для описания поведения материала в области пластического деформирования задействовали опции мультилинейного изотропного упрочнения и критерий пластичности Мизеса:

$$f\left(\sigma, \sigma_y\right) = \sigma_e - \sigma_y = 0. \tag{3}$$

где σ_e — эквивалентное напряжение фон Мизеса, $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}\left(\sigma\colon\sigma - \frac{1}{3}tr\left(\sigma\right)^2\right)}$, σ_y — предел текучести при одноосной нагрузке.

Для контроля точности сходимости предварительно подобрали сетку конечных элементов. При исследовании параметров двуслойной конструкции рассмотрели три варианта варьирования уровня предела текучести в нижнем слое в трех случаях — когда предел текучести в нижнем слое вдвое меньше верхнего, равен ему и вдвое больше (таблица. 1).

Таблица 1

Структура и параметры исследуемых конструкций

№ п/п	Уровень предела текучести в нижнем слое по отношению к верхнему (коэффициент — КЕ)	Слой, мм	
		верхний	нижний
1	1/2	1	9
2	1		
3	2		
4	1/2	2	8
5	1		
6	2		

Детальный анализ перемещений в различных точках наблюдения наглядно показывает отличие характера перемещений в области пластических деформаций. Для изучения перемещений выбрали следующую схему (рис. 2). Верхний слой конструкции для наглядности выделили более темным серым цветом.

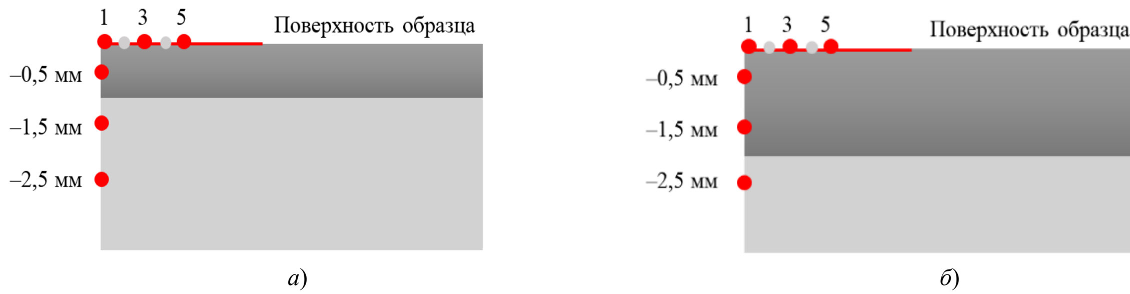


Рис. 2. Определение точек для измерений вертикальных и горизонтальных перемещений: *а* — конструкция с верхним слоем 1 мм; *б* — конструкция с верхним слоем 2 мм. Цифры 1, 3 и 5 обозначают уровень предела текучести в нижнем слое по отношению к верхнему в соответствии с таблицей 1

Результаты исследования. На рис. 3 представлена сравнительная характеристика уровня перемещений на поверхности образца с горизонтальным сдвигом точки наблюдения от точки ударного воздействия.

При верхнем слое 1 мм

При верхнем слое 2 мм

Перемещение, мм

Время, мс

а) *б)* *в)* *г)* *д)* *е)*

KE = 0,5 KE = 1 KE = 2

Рис. 3. Перемещения на поверхности образца в различных точках контакта: *а*, *б* — в 1-й точке контакта; *в*, *г* — в 3-й точке на поверхности; *д*, *е*, — в 5-й точке на поверхности

Как видим, для двухслойной конструкции с верхним слоем 2 мм изменение уровня текучести в 1-й и 3-й точках контакта при горизонтальном сдвиге не влияет на показатели перемещений внутри образца. В 5-й точке разница становится заметной. Для конструкции с верхним слоем 1 мм разница уровня перемещений заметна во всех точках наблюдения. Можно сделать вывод, что конструкция с меньшим верхним слоем более чувствительна к ударному воздействию.

На рис. 4 показаны распределения интенсивности напряжения при различном уровне верхнего покрытия. Приведенные данные позволяют утверждать, что в зоне 2 мм происходят колебания, связанные с переходом в зону пластичности, ниже этой зоны — упругие колебания, затухающие со временем.

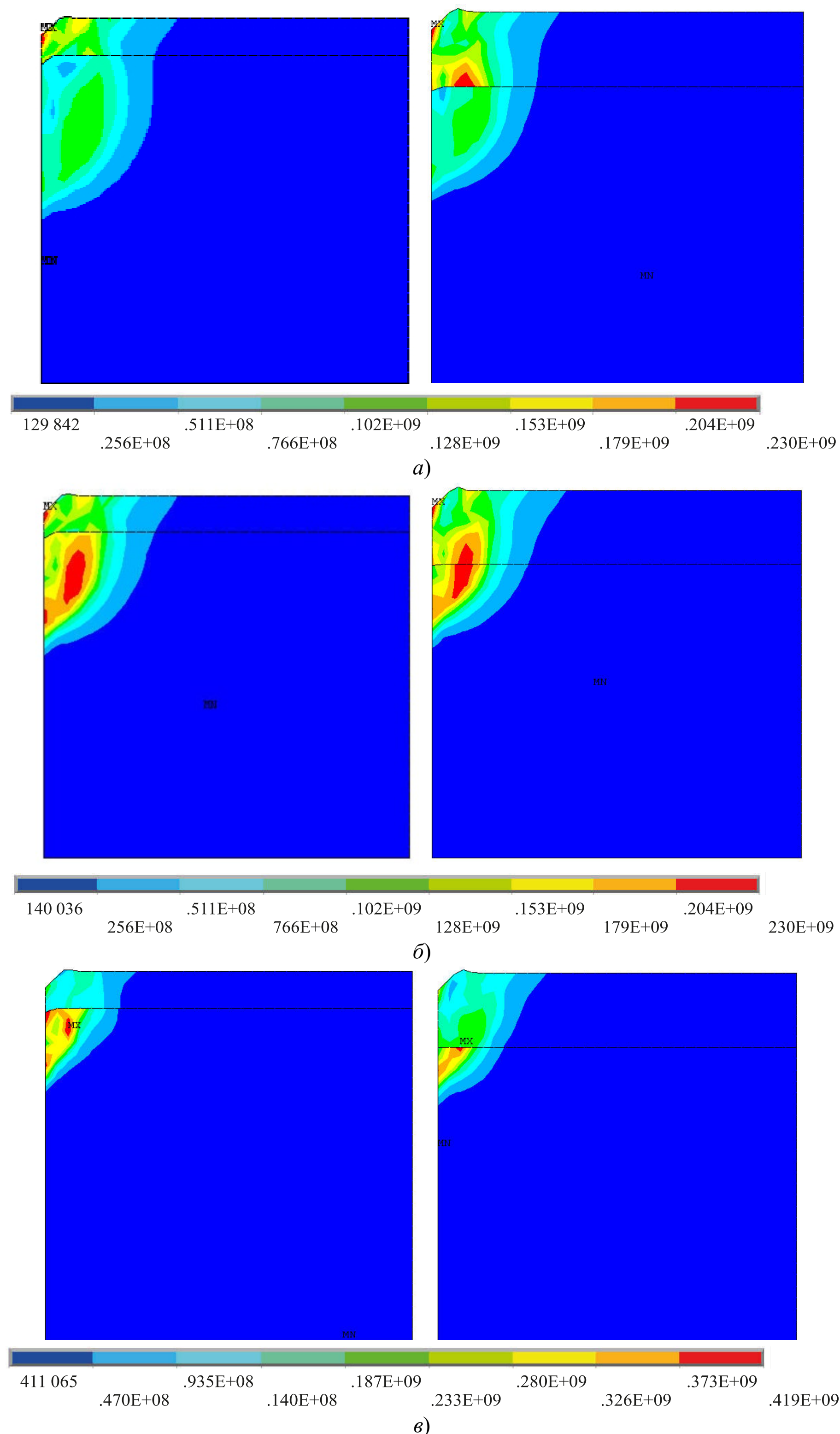


Рис. 4. Интенсивность напряжений при различных значениях КЕ, МПа: *а* — КЕ = 0,5; *б* — КЕ = 1; *в* — КЕ = 2

На рис. 5 построены графики напряжений на поверхности в различных точках наблюдений.

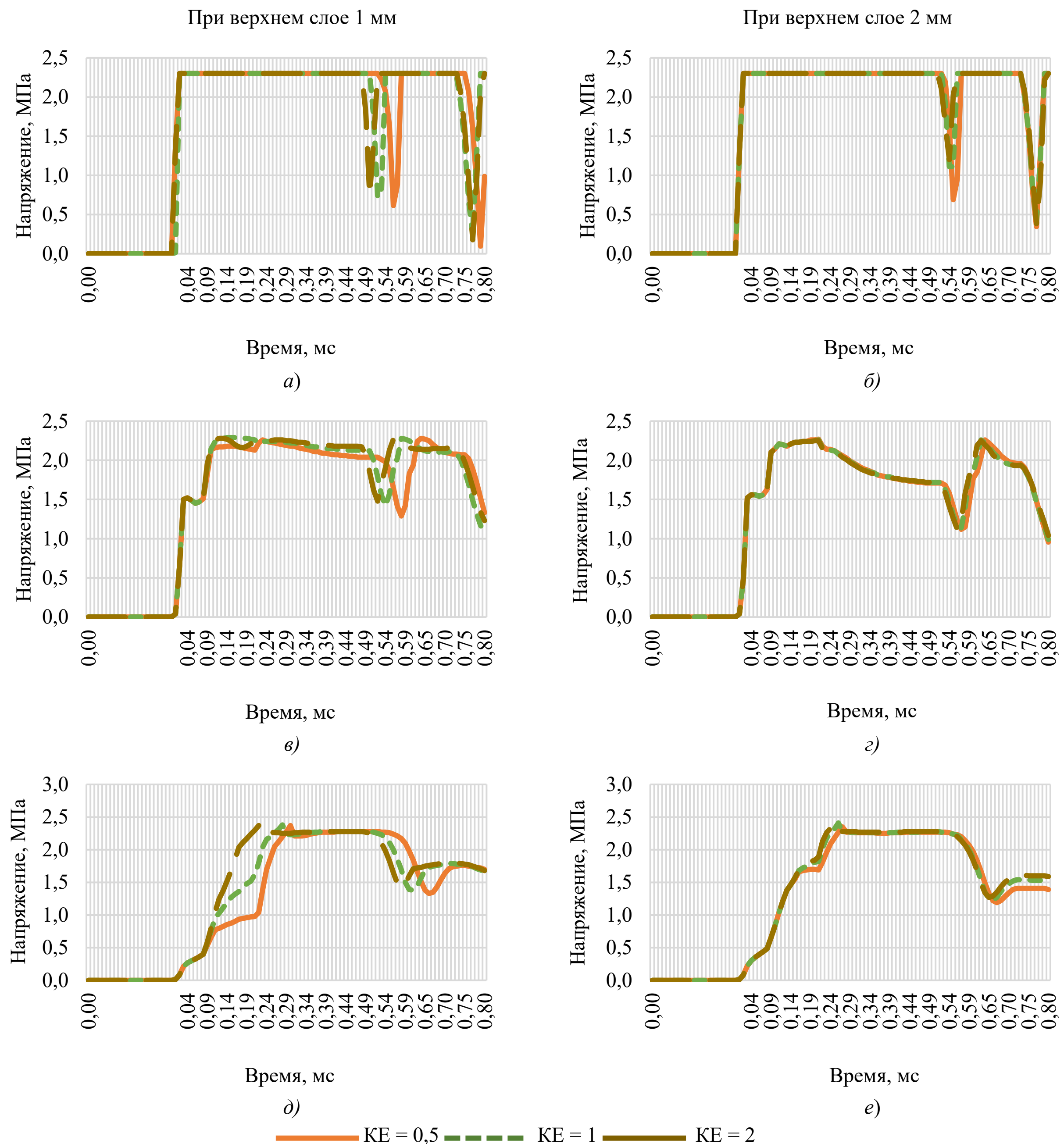


Рис. 5. Напряжения на поверхности образца в различных точках контакта:
а, *б* — в точке контакта; *в*, *г* — в 3-й точке на поверхности;
д, *е*, — в 5-й точке на поверхности

Для анализа влияния основания на прочностные свойства образца решили задачу классификации [12] по значению Бринеллевой твердости (HB) верхнего слоя материала с изменяющимися характеристиками основания. В рамках исследования выделили пять классификационных групп (таблица 2).

Таблица 2

Классификационные группы

№ п/п	Группа	Значение HB
1	I	200
2	II	300
3	III	400
4	IV	500
5	V	600

Расчетные значения, полученные с помощью математической модели, подавались на вход нейронной сети. На рис. 6 представлены значения скоростей и перемещений для выделенных групп твердости.

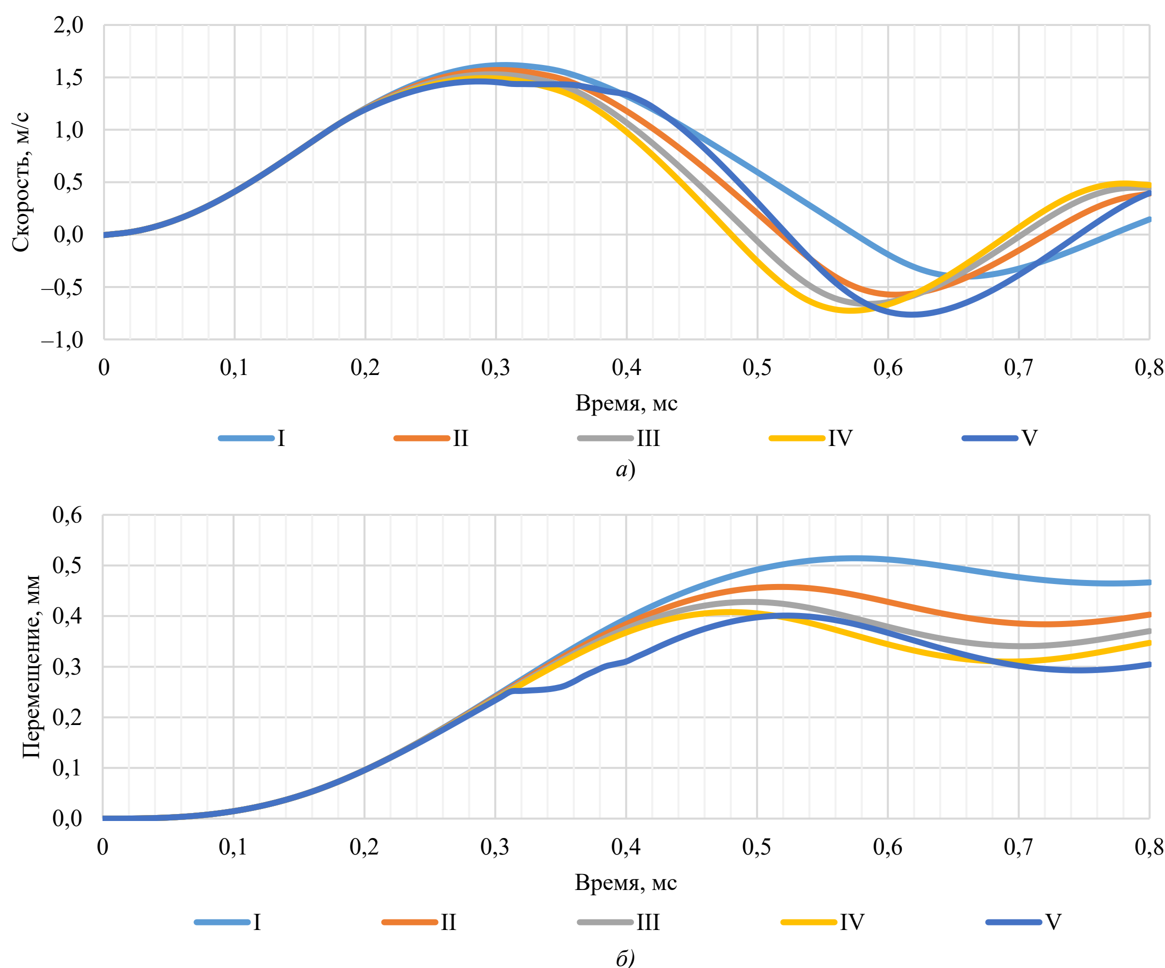


Рис. 6. Расчетные значения по классификационным группам:
а — скорость внедрения индентора; *б* — перемещения

Для дальнейшей обработки данных использовали созданную и обученную нейронную сеть с полносвязной структурой [13]. Стоит отметить, что нейронные сети обладают широкими возможностями в решении такого типа задач [14], в частности в области строительства [15]. Нейронные сети часто используются для качественной оценки, прогнозирования и мониторинга состояния строительных конструкций [16], а также для параметрической идентификации объектов [17]. Увеличение вычислительных мощностей нейронных сетей напрямую влияет на развитие их функционала [18].

Точность вычислений нейросети составила 98 %. Следовательно, нейросеть верно анализирует экспериментальные данные и способна адекватно учесть поведение материала при ударном нагружении.

Обсуждение и заключение. Таким образом, анализ распределения перемещений и напряжений в образце позволяет сделать ряд заключений.

1. Уровень вертикальных перемещений в волновом процессе значительно выше, чем в горизонтальном.
2. Уровень жесткости подложки влияет на распределение перемещений и напряжений.
3. В более прочном нижнем слое перемещения заметно меньше, чем в мягком.
4. Верхний слой чувствителен к прочности подложки, если его высота не превышает 1 мм.
5. С удалением от места индентирования деформации становятся упругими, напряжение не выходит в область пластических деформаций.

По итогам работы можно утверждать, что для определения прочностных свойств однородных конструкций достаточно одной величины, характеризующей скорость перемещения внутри образца. Для неоднородной структуры необходимо вводить такие дополнительные параметры, как перемещения на поверхности и внутри образца в фиксированных точках наблюдений. Комплексный подход к определению прочностных свойств неоднородной конструкции позволит повысить точность расчетов. А использование нейросетевых технологий для решения такого типа задач открывает возможность более быстрых вычислений.

Список литературы / References

1. Lyapin A, Beskopylny A, Meskhi B. Structural Monitoring of Underground Structures in Multi-Layer Media by Dynamic Methods. *Sensors*. 2020;20(18):5241. https://doi.org/10.3390/s20185241

2. Чесноков А.В., Михайлов В.В., Долматов И.В. Выявление повреждений мягкой оболочки тентовой строительной конструкции покрытия при помощи искусственной нейронной сети. *Строительная механика и конструкции*. 2022;33(2):98–109.

Chesnokov AV, Mikhailov VV, Dolmatov IV. Damage Detection in the Soft Shell of the Fabric Roof Construction of Buildings by means of Artificial Neural Network. *Structural Mechanics and Structures.* 2022;33(2):98–109.

3. Куклина М.В., Лебер А.И., Махакова А.М. Использование технологии нейронных сетей в строительной организации. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2022;(5–3):362–368. https://doi.org/10.17513/vaael.2219

Kuklina MV, Leber AI, Makhakova AM. The Use of Neural Network Technology in a Construction Organization. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law.* 2022;(5–3):362–368. https://doi.org/10.17513/vaael.2219

4. Кузьмичев М.В., Егоров Р.А. Моделирование и алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018;18(5):794–800. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-5-794-800

Kuzmichev MV, Egorov RA. Modeling and Algorithmic Provision of Dynamic Indentation Process. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2018;18(5):794–800. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-5-794-800

5. Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н. Прогнозирование технического состояния деталей индентированием в различных условиях нагружения. *Вестник Тверского государственного технического университета. Технические науки*. 2022;13(1):22–27.

Matlin MM, Kazankin VA, Kazankina EN. Prediction of the Technical Condition of Parts by Indenting in Different Loading Conditions. *Herald of Tver State University. Series: Technical Sciences.* 2022;13(1):22–27.

6. Рудницкий В.А., Крень А.П., Ланцман Г.А. Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования. *Литье и металлургия.* 2017;(2):81–87. https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-2-81-87

Rudnitsky VA, Kren AP, Lantsman GA. Evaluation of Metallic Materials Plasticity by Dynamic Indentation Method. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2017;(2):81-87. (In Russ.) https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-2-81-87

7. Oliver WC, Pharr GM. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. *Journal of Materials Research*. 1992;7:1564–1583. http://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564

8. Автономов Н.Н., Тололо А.В. Исследование распределения напряжения в образце при вдавливании шарового индентора. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2018;14(1):245–247.

Avtonomov NN, Tololo AV. Exploration of the Stress Distribution in the Specimen during Indentation of the Indenter Ball. *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics.* 2018;14(1):245–247.

9. Jun Lu, Subra Suresh, Guruswami Ravichandran. Dynamic Indentation for Determining the Strain Rate Sensitivity of Metals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 2003;51(11–12):1923–1938. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2003.09.007

10. Matyunin VM, Nuha Abusaif, Marchen*kov* AYu. Analysis of the Indentation Size Effect on the Hardness Measurements of Materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399(4):044016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044016

11. Varghese J, Radig GF, Herkommer D, Dasgupta A. Hybrid Experimental and Computational Approach for Rate Dependent Mechanical Properties Using Indentation Techniques. In: *EuroSimE 2005. Proc. 6th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems*. New York City: IEEE; 2005. P. 510–514. https://doi.org/510-514. 10.1109/ESIME.2005.1502858

12. Kubenko V. Nonstationary Displacements in an Axisymmetric Problem for an Elastic Half-Space Under Mixed Boundary Conditions. *International Applied Mechanics*. 2021;57:148–159. https://doi.org/10.1007/s10778-021-01069-3

13. Бескопыльный А.Н., Веремеенко А.А., Копылов Ф.С., Крымский В.С. Задача о статическом внедрении конического индентора в область с поверхностным упрочнением. *Инженерный вестник Дона.* 2018;49(2):214–218.

Beskopylny AN, Veremeenko AA, Kopylov FS, Krymskiy VS. The Problem for Static Conical Indentation into the Surface Hardened Area. *Engineering Journal of Don.* 2018;49(2):214–218.

14. Zesheng Lin, Hongxia Ye, Bin Zhan, Xiaofeng Huang. An Efficient Network for Surface Defect Detection. *Applied Sciences*. 2020;10(17):6085. https://doi.org/10.3390/app10176085

15. Babushkina N, Lyapin A, Kovaleva A. Analysis of Neural Network Results Based on Experimental Data during Indentation. In: *Topical Problems of Agriculture, Civil and Environmental Engineering. E3S Web of Conferences* (*TPACEE*). 2020;224:01018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022401018

16. Elfaki AO, Alatawi S, Abushandi E. Using Intelligent Techniques in Construction Project Cost Estimation: 10-Year Survey. *Advances in Civil Engineering*. 2014;2014:107926. https://doi.org/10.1155/2014/107926

17. Patel DA, Jha KN. Evaluation of Construction Projects Based on the Safe Work Behavior of Co-employees through a Neural Network Model. *Safety Science*. 2016;89:240–248. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2016.06.020

18. Порошин И.Е., Титов М.А. Использование искусственных нейронных сетей для параметрической идентификации объектов. *Молодой ученый.* 2020;316(26):39–42.

Poroshin IE, Titov MA. Using Artificial Neural Networks for Parametric Identification of Objects. *Young Scientist.* 2020;316(26):39–42. (In Russ.)

19. Алферьев Д.А. Использование искусственных нейронных сетей в современном обществе. *Социальная сфера*. 2020;6(3):6. https://doi.org/10.15838/sa.2020.3.25.6

Alfer'ev DA. Usage of Artificial Neural Networks in Modern Society. *Social Area*. 2020;6(3):6. https://doi.org/10.15838/sa.2020.3.25.6

Об авторах:

Наталья Евгеньевна Бабушкина, ассистент кафедры вычислительной техники и программирования Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, copybird@yandex.ru

Александр Александрович Ляпин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем в строительстве Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, lyapin.rnd@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.Е. Бабушкина: описание теоретической части исследования, проведение расчетов, создание нейронной сети, формирование выводов, оформление научной статьи.

А.А. Ляпин: постановка цели и задач исследования, анализ результатов исследования, доработка текста, корректировка выводов.

***Конфликт интересов*: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Natalia E. Babushkina, Teaching assistant of the Computer Engineering and Programming Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, copybird@yandex.ru

Alexandr A. Lyapin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Information Systems in Construction Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, lyapin.rnd@yandex.ru

Claimed Contributorship:

NE Babushkina: description of the theoretical part of the study, calculations, creation of a neural network, formulation of conclusions, design of the scientific article.

AA Lyapin: setting research objective and tasks, analysis of the study results, revision of the text, correction of the conclusions.

***Conflict of Interest Statement:* the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 28.05.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 25.06.2024
Принята к публикации / Accepted 27.06.2024